

論文 実構造物の中性化による劣化の定量分析に基づいた鉄筋腐食速度に関する一考察

松橋 宏治*1・轟 俊太郎*2・曾我部 正道*3・谷村 幸裕*2

要旨: 本研究では、中性化により劣化した実構造物に対する詳細な調査結果を基に、劣化状況や影響要因に関する定量的な分析を行い、剥離・剥落の予測に用いる場合の鉄筋腐食速度について検討した。調査結果より、鉄筋腐食開始の閾値である中性化残り 10mm が概ね適切であること、柱面方向の違いによる雨がかりからの水分供給程度の違いが、鉄筋の腐食速度に影響を及ぼすことを示した。また、鉄筋の腐食速度を 3×10^{-3} mm/年、剥離・剥落発生時の腐食深さを $56 (c/\phi) \times 10^{-3}$ mm とした劣化予測計算を行った結果、雨がかりを直接受ける柱面では 10% 程度の誤差で評価できたが、それ以外の柱面については 2~3 倍程度過大評価した。

キーワード: 中性化, 鉄筋腐食, 構造物調査, 劣化予測

1. はじめに

近年、中性化に対する耐久性照査¹⁾が行われるようになり、今後新設される構造物においては、中性化の問題は概ね解消されると考えられる。中性化による劣化は塩害と比べて緩やかであるものの、比較的早期に鉄筋腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥落といった構造的な問題を引き起こす場合がある。既存 RC 構造物では、かぶり不足の箇所において剥落が生じた例が少なくないのが現状で、時間の経過と共に今後更に増加すると考えられる。コンクリート片の剥落は、公衆安全を脅かす可能性があるため、これを未然に防ぐ適切な維持管理は社会的影響の面から非常に重要である。構造物の維持管理は、予め立てた維持管理シナリオに基づき、計画的に実施することが合理的である。この場合、経年による劣化の進行を予測することが必要不可欠であり、これを定量的に十分な精度で行うことは、安全性のみならず経済性の観点からも非常に重要である。しかし、中性化による鉄筋腐食の予測に関連する研究は多く報告されているものの、実構造物に対する検証は、未だ不十分なのが現状と考えられる。

そこで本研究では、中性化による劣化が顕在化した実構造物に対する詳細な調査結果を基に、劣化因子や劣化の状況に関する定量的な分析を行った。また、調査で得られた劣化状況に基づき、中性化による剥離・剥落の予測に用いる場合の鉄筋腐食速度について検討を行った。

2. 構造物調査

2.1 対象構造物

構造物調査の対象は、剥離剥落といった鉄筋腐食によ

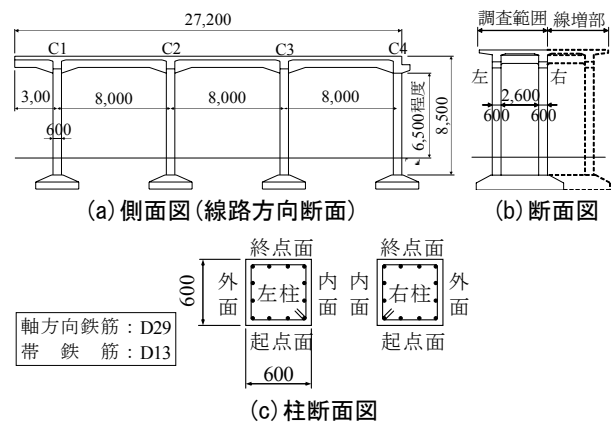


図-1 対象構造物(R2 ブロック)の形状寸法 (単位:mm)

と思われる変状が顕在化した、RC ビームスラブ式ラーメン高架橋の柱部材を対象とし、ほぼ同一の形状寸法を有する 2 ブロック (以下、R1 および R2 ブロックと称する) に対し実施した。図-1 に R2 ブロックの一般形状および寸法を示した。なお、R1 ブロックと R2 ブロックは線路方向に隣接しており、構造物の置かれる環境条件はほぼ同一と考えられる。本高架橋は、供用開始から 35 年が経過しており、当初、2 柱式の単線高架橋として築造され、時期は不明であるが線増により 3 柱式複線高架橋に拡幅された。本調査では、当初に築造された範囲を調査対象とした。コンクリートの設計基準強度 f'_{ck} は 24N/mm^2 で、最大水セメント比 W/C は 55% であることが本高架橋のしゅん工図より明らかとなっているが、実際の配合条件等を示す施工記録は現存していない。また、鉄筋は SD295 が用いられており、軸方向鉄筋は D29 が柱 1 面当たり 4 本、帯鉄筋は D13×1 組が部材軸方向に 150mm または 300mm 間隔で配置されている。

*1	パシフィックコンサルタンツ(株) 大阪本社	交通技術部	工修	(正会員)
*2	(財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部	コンクリート構造	工修	(正会員)
*3	(財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部	コンクリート構造	博(工)	(正会員)
*4	(財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部	構造力学	博(工)	(正会員)

本高架橋は市街地に立地しており、高架橋の左側には民家が軒を連ね、右側（線増側）は空き地となっている。海岸線からの距離は1km程度で、飛来塩分の影響は受けないと考えられ、また、事前調査により確認した部材深部の塩化物イオン濃度は $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 程度以下であったことから初期塩化物イオンも極少量で、塩化物イオンによる鉄筋腐食の可能性は小さいと考えられる。そのため、本高架橋に見られる鉄筋腐食によると思われる変状は、コンクリートの中性化が主な要因として推定された。

2.2 調査内容と調査箇所数

本研究では、中性化深さ及びかぶりの測定、並びに鉄筋腐食による変状（ひび割れ、剥離剥落）の発生率に関する調査を、柱の全高6m程度の範囲に対して行う詳細調査と、地上から2m以内の範囲に限定して行う簡易調査の2パターンを複数の柱に対し実施した。また、幾つかの柱面に対し、はつり出した鉄筋の腐食度に関する調査を実施した。表-1に調査箇所数を示す。

2.3 調査方法

(1) 中性化深さ

中性化深さは、コンクリートをハンマードリルにより径25mm、深さ50mm程度に削孔した孔内に、フェノールフタレイン1%溶液を噴霧し赤色に変色する位置のコンクリート表面からの深さをノギスにより測定した。本測定は削孔面に対して行うことから、はつり法（JIS A1152）に順じて実施した。削孔1箇所につき孔の上下左右4点で測定し、その平均値を1箇所当りの中性化深さとした。柱1面当りの測定箇所数は図-2(a)に示すとおりで、これを、柱4面全てに対し実施した。詳細調査では柱1面当たり4又は8箇所（1.5m程度又は0.75m程度の間隔）測定を行い、柱高さ方向へのばらつきを調査した。簡易調査では、地上から1m程度の高さ位置1箇所測定した。

(2) かぶり

かぶりは、電磁波レーダーにより対象とする帯鉄筋の位置を特定した後、電磁誘導法による鉄筋探査機を用い非破壊により測定した。図-2(a)に示すとおり、柱1面当たり2本の測線を設け、調査範囲全ての帯鉄筋について測定した。測定した鉄筋本数は、詳細調査では柱1面当たり25本程度、簡易調査では10本程度である。

(3) 変状発生率

本研究では、帯鉄筋の腐食によると思われる変状に着目し、変状の発生状況を変状発生率として定量化した。まず、近接目視および打音により柱表面に生じたひび割れおよび剥離・剥落を確認し、変状の発生位置、方向、範囲について詳細に記録した。次に、電磁波レーダーにより位置を特定した帯鉄筋上に変状確認点を設け、その点での変状の有無をひび割れ、剥離剥落に分けて確認

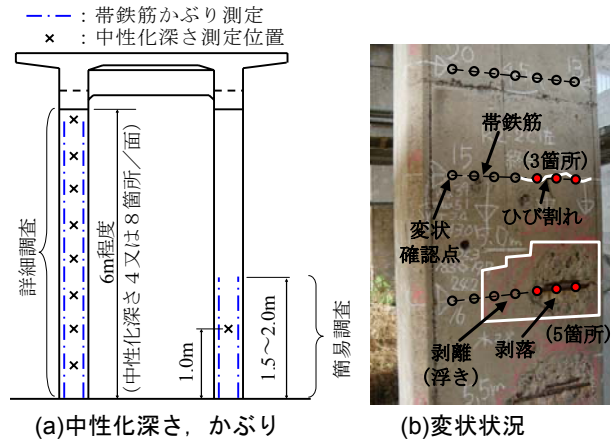


図-2 調査要領

表-1 調査箇所数

	調査範囲	高架橋ブロック	
		R1	R2
簡易調査	下部1.5~2m範囲	5本	5本
詳細調査	全高6m程度	1本	3本
鉄筋腐食度	下部1m付近	3箇所	4箇所

表-2 鉄筋腐食度の評価基準²⁾

腐食度	評価基準
0	施工時の状況を保ち以降の腐食が見られない
I	部分的に軽微な腐食が見られる
II a	表面の大部分に腐食が認められる
II b	部分的に断面欠損が認められる
III	鉄筋の全周にわたり断面欠損が認められる
IV	鉄筋断面が1/6以上欠損している

し、確認した変状の箇所数の全変状確認点に対する割合を変状発生率とした。なお、変状確認点は、図-2(b)に示すとおり、帯鉄筋1辺当たり7点とした。これは、軸方向鉄筋上の4点とその中間点3点としたものである。

(4) 鉄筋腐食度

鉄筋の腐食度は、150×150mm程度の範囲で鉄筋が完全に露出するまではつり出した後、目視により表-2に示す基準²⁾により判定した。

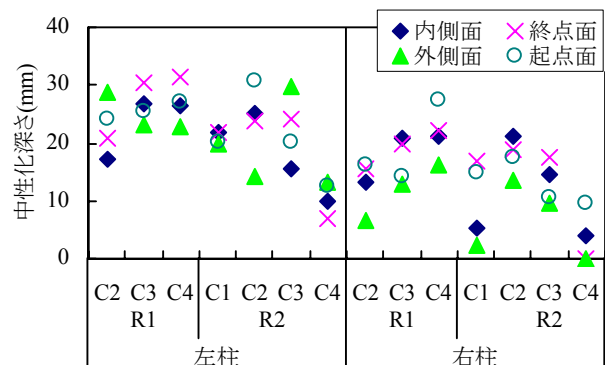


図-3 柱高さ1m位置の中性化深さ

3. 調査結果

3.1 中性化深さ

図-3には、地上1m高さで測定した中性化深さの柱毎の分布状況を、表-3には図-3で示した測定値の平均値、標準偏差および標準偏差を平均値で除した変動係数を柱の面方向別に示した。以降の図表において示す面方向の位置関係は、図-1(c)に示すとおりである。図-3より、地上1m高さでの中性化深さは0~30mm程度の範囲で柱毎にばらついており、また同一柱においても測定面により10mm程度以上の差のある場合がほとんどであった。また表-3より、地上1m高さの中性化深さの平均値は、柱面別で15.2~19.3mm、全体では17.8mmであった。また、ばらつきの程度を示す変動係数は、柱面別には0.35~0.59、全体では0.44であった。

図-4には、詳細調査で測定した柱高さ方向の中性化深さの分布状況を示した。既往の研究³⁾において、柱上部の打継目付近ではブリーディング等の影響で材料品質が低下し、中性化深さが大きくなる傾向にあることが示されているが、図-4に示す調査結果では、柱高さ方向の分布に明確な傾向は見られなかった。

3.2 かぶり

図-5は、帯鉄筋かぶりの測定結果に基づき、各柱の高さ方向1.5m範囲毎の平均値を、柱面別に整理したものである。図-5に示す結果において、柱高さ位置~1.5mの結果(0.0~1.5m範囲の平均値)は簡易調査および詳細調査を合わせた10本の柱の結果で、これ以外の高さ位置は詳細調査を行った4本の柱の結果である。

図-5について、測定数の多い柱高さ0.0~1.5mの結果に着目すると、(a)内側面では22~67mm(平均39mm)、(b)終点面では15~52mm(平均30mm)、(c)外側面では10~51mm(平均30mm)、(d)起点面では15~51mm(平均34mm)で、各面の標準偏差は8.3~11.8mmであった。その他の柱高さについては、調査本数が少なく明確とは言い難いが、柱高さ位置が高くなるにしたがい、柱によるかぶりのばらつきが小さくなる傾向が見られる。

3.3 変状発生率

図-6に変状発生率の調査結果として、図-5で示したかぶりの測定結果と同様に、柱高さ毎の変状発生率を柱面別に整理した。図-6より、(a)内側面に関しては、ひび割れの発生率が最大20%程度で、剥離・剥落の発生率は何れの柱でも0%であった。(b)終点面に関しては、ひび割れの発生率が何れの柱高さでも最大20%程度以下で、剥離・剥落の発生率は柱高さ3m以下の範囲で最大30~40%程度であった。(c)外側面に関しては、ひび割れの発生率は何れの柱高さでも最大10%以下で、剥離・剥落の発生率は、柱高さ3m以下の範囲で最大80程度、柱高さ3.0~4.5mの範囲で50%程度、柱高さ4.5~6.0mの

表-3 地上1m高さの中性化深さの集計(mm)

	内側面	終点面	外側面	起点面	全面
平均値	17.3	19.3	15.2	19.3	17.8
標準偏差	7.3	8.2	9.0	6.8	7.9
変動係数	0.42	0.43	0.59	0.35	0.44

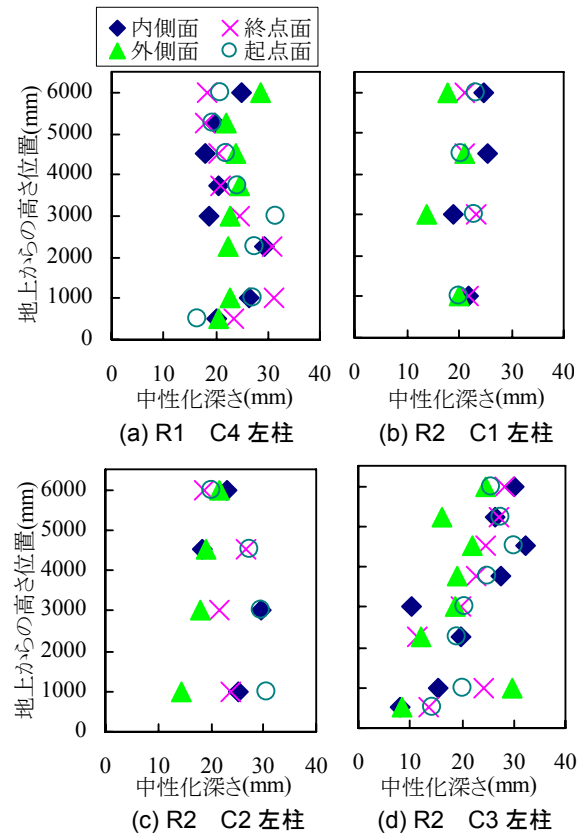


図-4 中性化深さの柱高さ方向分布

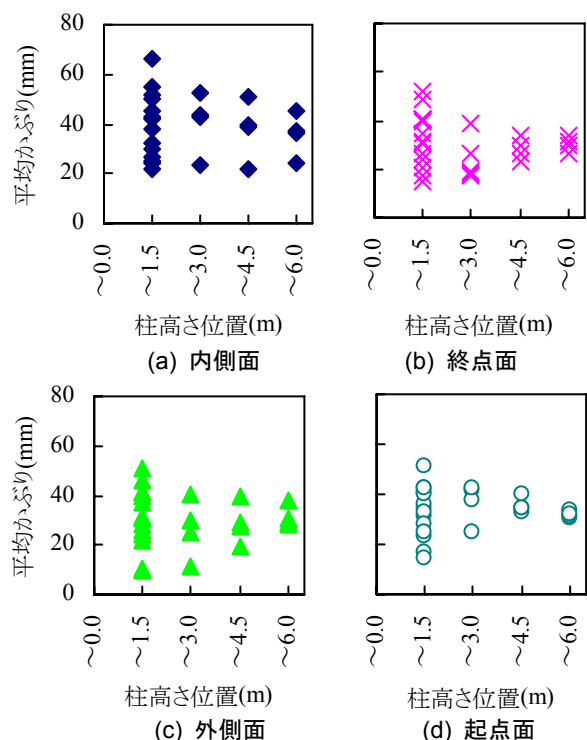


図-5 1.5m高さ毎の平均かぶり

範囲で30%程度であった。(d)起点面に関しては、ひび割れの発生率は柱高さ1.5~4.5mの範囲で20~30%程度が確認され、剥離・剥落の発生率は柱高さ0.0~1.5mの範囲で20%弱、その他の柱高さでは数%程度以下であった。

3.4 鉄筋の腐食度

図-7に、はつり箇所において判定した鉄筋の腐食度と、同箇所直接測定した中性化残りとの関係を示した。はつりは、1箇所を除き表面に変状のない健全箇所を選定して行った。図-7より、表面上、健全な箇所においてもある程度は腐食が生じており、中性化残りが小さくなるに従い腐食度が高くなる傾向が確認された。また、はつり出した長さ150mm範囲における腐食の分布状況は、ほぼ一様な場合と、部分的に程度の高い腐食がある場合とで半数程度ずつであった。

4. 変状発生率の調査結果に関する考察

4.1 中性化深さと変状発生率の関係

図-8に、図-6で整理した柱高さ1.5m毎の変状発生率と同範囲における平均中性化深さとの関係を示した。図-8より、ひび割れおよび剥離・剥落ともに、中性化深さが15mm程度から生じ始めている。

(a)ひび割れの発生率は、中性化深さが大きくなるに従い変状発生率が大きくなる傾向が若干見られるが、得られた変状発生率が小さく明確とはいえない。本研究で目視により確認したひび割れには、コンクリートの収縮など鉄筋腐食以外の要因で生じたものも含まれると考えられるが、これらを外観のみで分類することは困難である。また、鉄筋腐食により生じるひび割れは、その初期段階では非常に微細なため、目視による確認には限界がある。そのため、本研究で示すひび割れ発生率と鉄筋腐食との関連を明確に見出すことは困難であると考えられる。

(b)剥離・剥落の発生率は、中性化深さが比較的大きな範囲で大きな変状発生率が得られてはいるものの、両者に明確な関係は見られなかった。中性化深さは、コンクリートの組織構造やW/Cと関連し、鉄筋腐食に対する抵抗性や腐食速度、および変状発生に対する抵抗性に影響を及ぼすことが考えられるが、図-8に示す結果では変状発生率との間に明確な関係は見られなかった。

4.2 中性化残りとの関係

図-9には、図-6で示した柱高さ1.5m毎の変状発生率と、同範囲の平均中性化残りとの関係を示した。ここで平均中性化残りは、調査で得たかぶり測定値からその直近の中性化深さ測定値を差し引き、柱高さ1.5m範囲毎に平均値を整理したものである。

図-9(a)より、ひび割れは中性化残りが20mm程度以下から生じ始め、中性化残りが小さくなるに従い変状発生率が大きくなる傾向が若干見られる。しかし、前節で

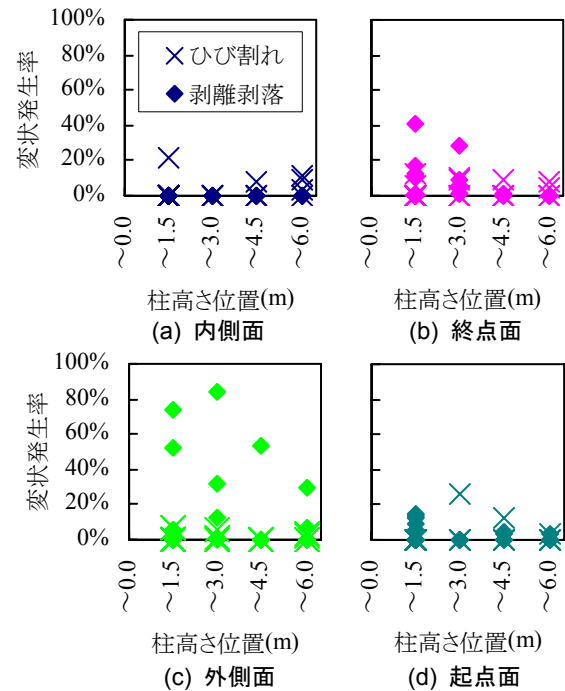


図-6 柱高さ1.5m毎の変状発生率

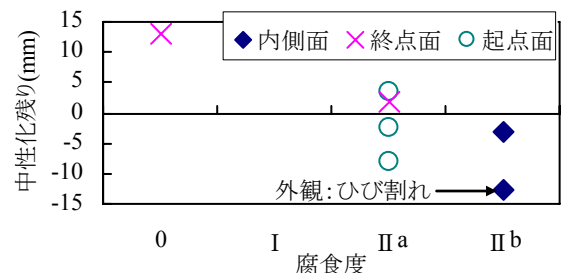


図-7 中性化残りとの鉄筋の腐食度との関係

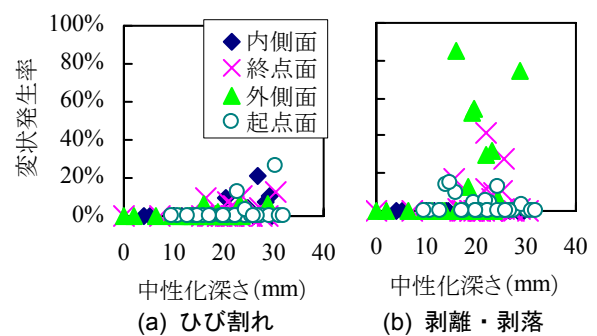


図-8 中性化深さと変状発生率の関係

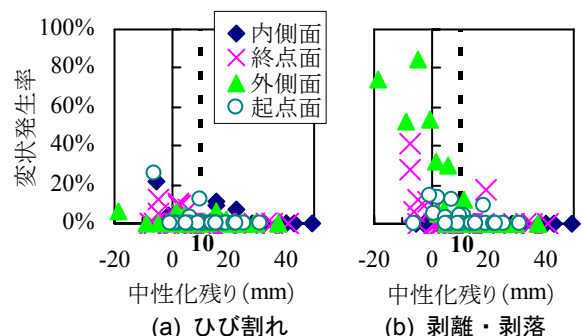


図-9 変状発生率と中性化残りの関係

述べた通り、本研究で得られたひび割れの発生率と鉄筋腐食との関連を見出すことは困難と考えられる。

図-9(b)より、剥離・剥落が全く生じていない内側面を除き、中性化残りが小さくなるに従い剥離・剥落の発生率が大きくなる傾向が見られる。また、中性化残り20mm程度で10~20%程度の変状が見られる場合はあるが、概ね中性化残り10mm程度から剥離・剥落の発生が顕在化していると言える。土木学会示方書¹⁾では、耐久性を照査する場合における鉄筋腐食が開始する中性化残りを10mmとしており、実構造物の調査結果に基づく図-8に示すデータは、示方書に記される鉄筋腐食開始の閾値が概ね妥当であることを示すものと考えられる。

4.3 柱面の違いによる変状発生率

変状発生率を整理した図-8および図-9より、剥離・剥落の発生は外側面において特に顕著で、次いで終点面ならびに起点面で大きく、内側面では剥離・剥落が全く生じていない。

柱面により剥離・剥落発生率に差が生じる要因は、鉄筋腐食に影響を及ぼす環境条件の違いであると考えられ、本研究で対象とした高架橋柱の場合では、雨がかりの有無や程度之差がこれに該当すると考えられる。すなわち、雨がかりを受け易く水分供給が他の面よりも多いと考えられる外側面は、鉄筋腐食が生じ易く腐食速度も大きくなる環境条件であると考えられる。高架橋の上床に遮られ雨がかりをほとんど受けない内側面では、図-7で示した通りある程度、鉄筋腐食が生じてはいるが、水分の供給が限定的であるため腐食速度が非常に遅く、剥離・剥落が生じる程の腐食量には達していないと考えられる。また、終点面や起点面では、外側面ほどではないがある程度の雨がかりは受けるため、内側面と外側面の中間的な剥離・剥落発生率となったと考えられる。

5. 鉄筋の腐食速度に関する検討

5.1 検討の概要

ここでは、劣化予測計算により対象構造物の変状発生率を評価し、これと調査結果を比較することにより、中性化の影響を受ける実構造物における鉄筋腐食速度について考察を行う。劣化予測は、図-10に示す概念図に従い、鋼材腐食速度に基づき算定した腐食量から変状を判定する方法により、調査時点の経年35年における変状発生の有無を判定した。この計算を、図-2に示す変状確認点毎に調査した全ての柱に対し実施し、調査結果の整理と同様に変状発生率の予測結果として整理する。

5.2 劣化予測のパラメータ

(1) かぶり

かぶりには、構造物調査で得られた実測値を用いる。ここで、図-2に示す変状確認点におけるかぶりは、測

定値の線形補間により求めた。

(2) 腐食開始時点の中性化残り

鉄筋腐食が開始する中性化残りは、前記において妥当性が示された土木学会示方書¹⁾の閾値である10mmとした。また、中性化残りの経時変化を算定する上での中性化速度係数は、調査で得られた中性化深さに基づき \sqrt{t} 則により算定した。

(3) 鉄筋の腐食速度

鉄筋の腐食速度 dr/dt は、腐食開始から剥離・剥落の発生までを一定値とし、屋外暴露試験結果に基づく鳥取らの研究⁴⁾により提案された $dr/dt=3 \times 10^{-3}$ mm/年とした。これを柱の高さ位置や面方向に関わらず、全ての変状確認点に対し適用した。

(4) 剥離・剥落発生時の腐食深さ

剥離・剥落発生時の腐食深さ Δr_{sp} は、かぶり c と鉄筋径 ϕ との比により表される式(1)⁴⁾を用いた。

$$\Delta r_{sp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3} \text{ (mm)} \quad (1)$$

ここに、 c : かぶり(mm)、 ϕ : 鉄筋径(mm)

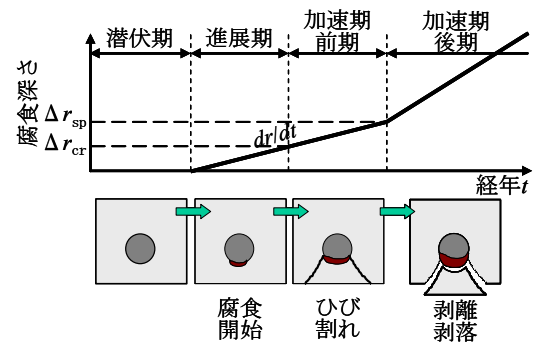


図-10 劣化予測計算の概念図

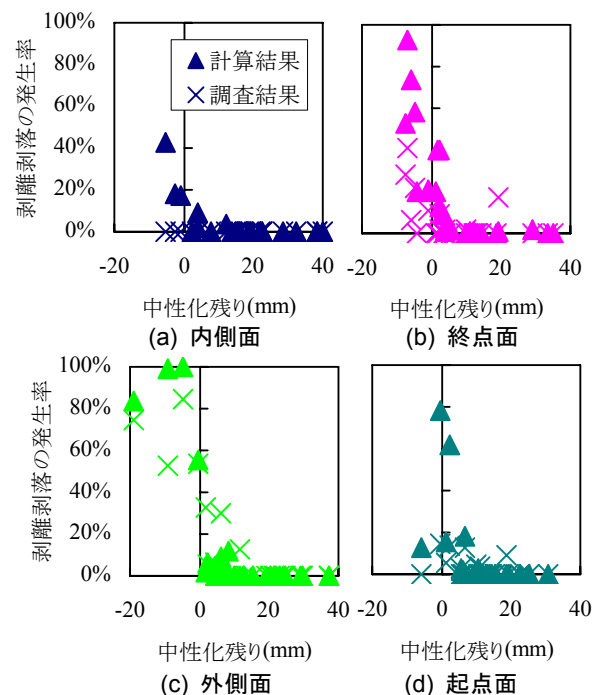


図-11 剥離剥落発生率の計算結果と中性化残りの関係

5.3 検討結果

図-11に、劣化予測計算で得られた剥離・剥落の発生率と中性化残りとの関係を示した。同図中には比較のため、図-9(b)で示した剥離・剥落の発生率の調査結果も示している。図-11より、調査結果において剥離・剥落の発生が確認されなかった(a)内側面においても予測結果では剥離・剥落が発生する結果となっている。(a)内側面については、先に述べたように雨がかりによる水分供給が少ないことから、このような箇所に対しては本検討で設定した腐食速度よりもかなり減じて評価する必要があると考えられる。その他の面については、何れの面においても中性化残りが10mm程度から剥離・剥落が急増する調査結果の傾向を捉えていると言える。しかし、計算結果と予測結果の絶対的な比較においては、両者にかかなりの差がある場合も多く見られる。そこで、図-12に同一箇所における剥離・剥落発生率の計算結果と調査結果との比較を示した。同図中には、それぞれの面における調査結果と計算結果との線形回帰結果も示した。

図-12より、外側面では剥離・剥落発生率の大きな範囲で計算結果は予測結果と良い一致を示しており、両者の線形回帰式は $y=1.13x$ ($R^2=0.84$)で10%程度の誤差であった。一方で、終点面および起点面に関しては、計算結果は調査結果を過大評価しており、それぞれの線形回帰式は終点面では $y=2.12x$ ($R^2=0.48$)、起点面では $y=3.19x$ ($R^2=0.64$)で、計算結果の剥離・剥落発生率は調査結果の2~3倍程度であった。したがって、雨がかりの影響を直接受けるような外側面に比べると比較的影響を受けないと考えられる起点面や終点面のような箇所に対しては、雨がかりの影響を直接受ける面よりも腐食速度を減じて評価する必要があると考えられる。

前述した線形回帰式より、計算結果と調査結果の間にはある程度の線形関係は確認される。外側面では比較的高い相関関係が得られたが、図-12において調査結果の剥離・剥落発生率が30%程度であるのに対し、計算結果はこれを過小評価する場合も見られた。また、終点面および起点面では、計算結果と予測結果の線形相関には大きなばらつきが見られる。このようなばらつきは、本検討では一定値とした、腐食開始の中性化残り、腐食速度、ならびに剥離・剥落発生時の腐食量といった種々の要因のばらつきによるものと考えられ、より合理的な評価や予測を行うには、今後これらのばらつきについても検討する必要があると考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 柱高さ1.5m範囲毎の平均中性化深さと変状発生率との関係を整理した結果、中性化深さの大きな範囲で

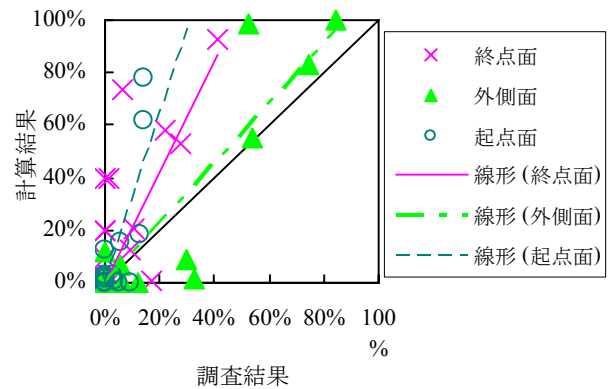


図-12 剥離・剥落発生率の計算結果と調査結果の比較

変状発生率が大きい結果は得られたが、両者には一定の関係は見られなかった。

- (2) 柱高さ方向に1.5m範囲毎の平均中性化残りと変状発生率との関係を整理した結果、中性化深さの減少とともに変状発生率が大きくなる傾向が確認された。また、調査結果において変状の発生は、中性化残りが10mm以下の範囲で大きくなっており、土木学会示方書に示される鉄筋腐食が開始する中性化残りの閾値10mmが概ね妥当であることを示した。
- (3) 調査結果で得られた柱面による変状発生率の差異より、変状の発生には雨がかりによる水分供給の大小が影響することを示した。
- (4) 調査で得られたかぶりや中性化速度係数を基に、調査対象構造物の現時点における剥離・剥落発生率を劣化予測計算により評価した。その結果、鉄筋の腐食速度 $dr/dt=3.0 \times 10^{-3}$ mm/年、剥離・剥落が発生する時点の腐食深さ $\Delta r_{sp}=56(c/\phi) \times 10^{-3}$ mmの条件下で、外側面では10%程度の誤差で評価できたのに対し、終点面および起点面では2~3倍程度過大する結果が得られた。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008
- 2) 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会：山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書，2000.7
- 3) 谷村幸裕，長谷川雅志，曾我部正道，佐藤勉：鉄道RCラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.147-157，2004.
- 4) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.35-46，2004.